



止於至善

# 第三篇 异步电机

## 第九章

### 异步电机的理论分析与运行特性



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

## 电机负载的类型介绍

大体可以分为：

- ◆ 恒转矩负载
- ◆ 恒功率负载
- ◆ 流体类负载



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>



## 恒转矩负载

在这类负载中，负载转矩 $T$ 与转速 $n$ 无关，任何转速下 $T$ 总保持恒定或基本恒定，负载功率则随着负载速度的增高而线性增加。传送带、搅拌机、挤压机和机械设备的进给机构等摩擦类负载以及起重机、提升机、电梯等重力负载，都属于恒转矩负载。

变频器拖动恒转矩性质的负载时，低速时的输出转矩要足够大，并且要有足够的过载能力。如果需要在低速下长时稳速运行，应该考虑标准笼型异步电动机的散热能力，避免电动机温升过高。 $W=T \cdot V$



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 恒功率负载

这类负载的特点是需求转矩 $T$ 与转速 $n$ 大体成反比，但其乘积即功率却近似保持不变。金属切削机床的主轴和轧机、造纸机、薄膜生产线中的卷取机、开卷机等，都属于恒功率负载。



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

### 流体类负载

这类负载的转矩与转速的二次方成正比，功率与转速的三次方成正比。各种风机、水泵和油泵，都属于典型的流体类负载。

流体类负载通过变频器调速来调节风量、流量，可以大幅度节约电能。由于流体类负载在高速时的需求功率增长过快，与负载转速的三次方成正比，所以不应使这类负载超工频运行。



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 第九章

### 异步电机的理论分析与运行特性

- 异步电机的基本结构
- 异步电机的运行状态和磁场
- 三相异步电机的等效电路
- 异步电机的参数
- 异步电动机的功率平衡式和转矩平衡式
- 异步电动机的机械特性及稳定运行条件
- 异步电动机的工作特性



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## 1. 异步电机的基本结构

- 异步电机：感应电机 (Induction Machine)
- 优点：
  - 结构简单，制造、使用和维护方便
  - 运行可靠，价格较低
- 缺点：
  - 调速和起动性能不佳
  - 功率因数低，增加了电力系统的无功负担
- 主要作为电动机，应用最广、需求最大



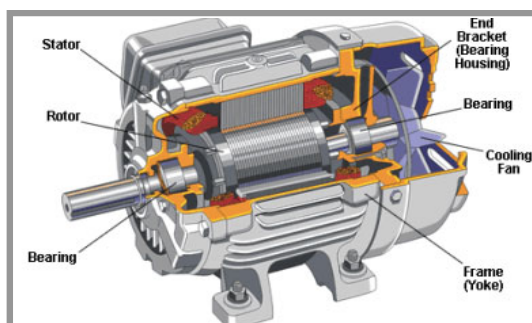
东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 1. 异步电机的基本结构

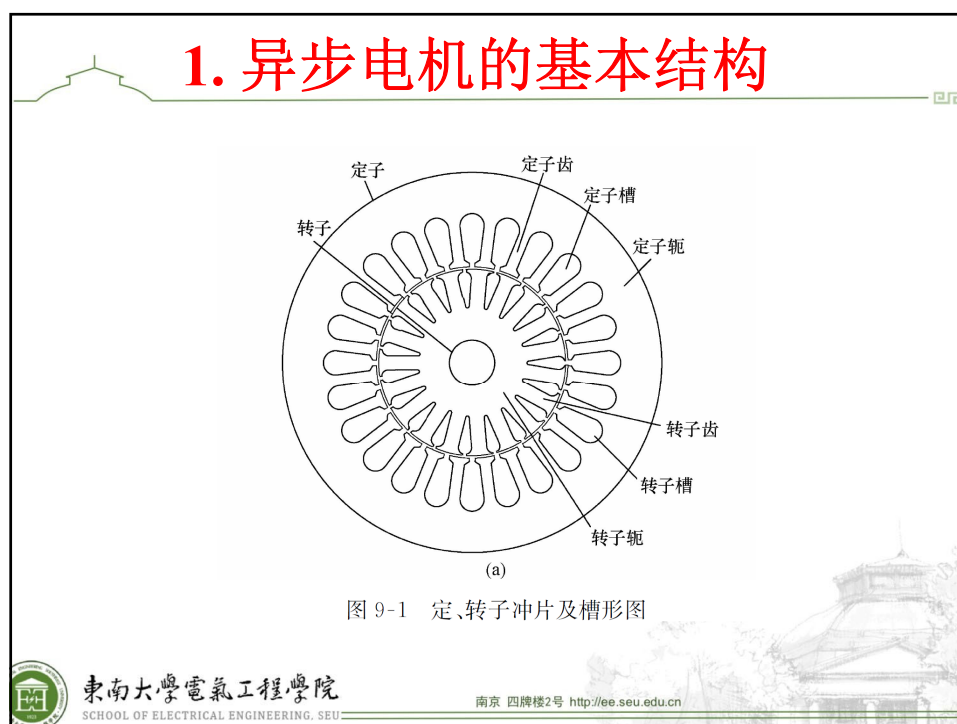
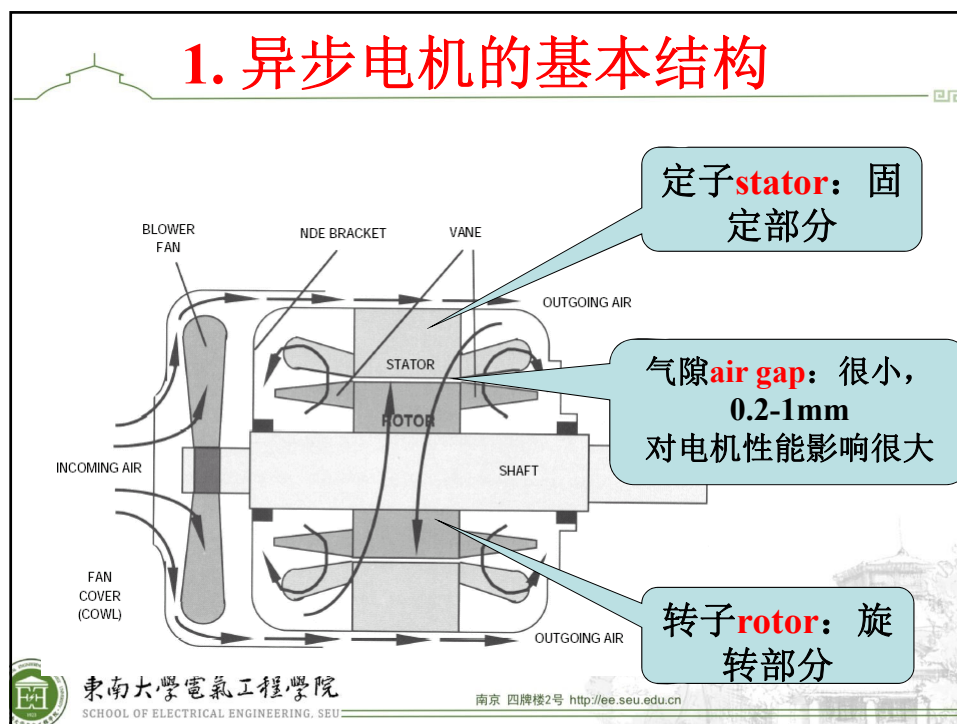
### 一、异步电机的基本结构

- 按转子的结构，分成绕线型和笼型
- 主要结构部件：定子、转子、气隙



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

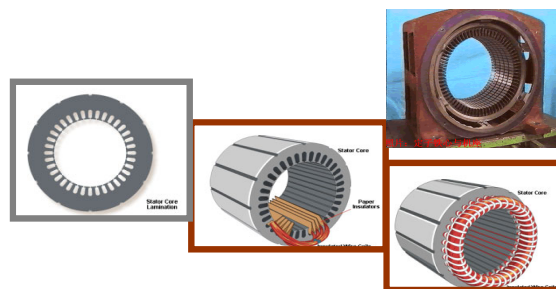
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



# I. 定子

## ➤ 定子

- 三相对称交流绕组，下在定子铁芯中
- 铁芯：用**硅钢片**叠成；特点：“内圈开槽”



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

# I. 定子

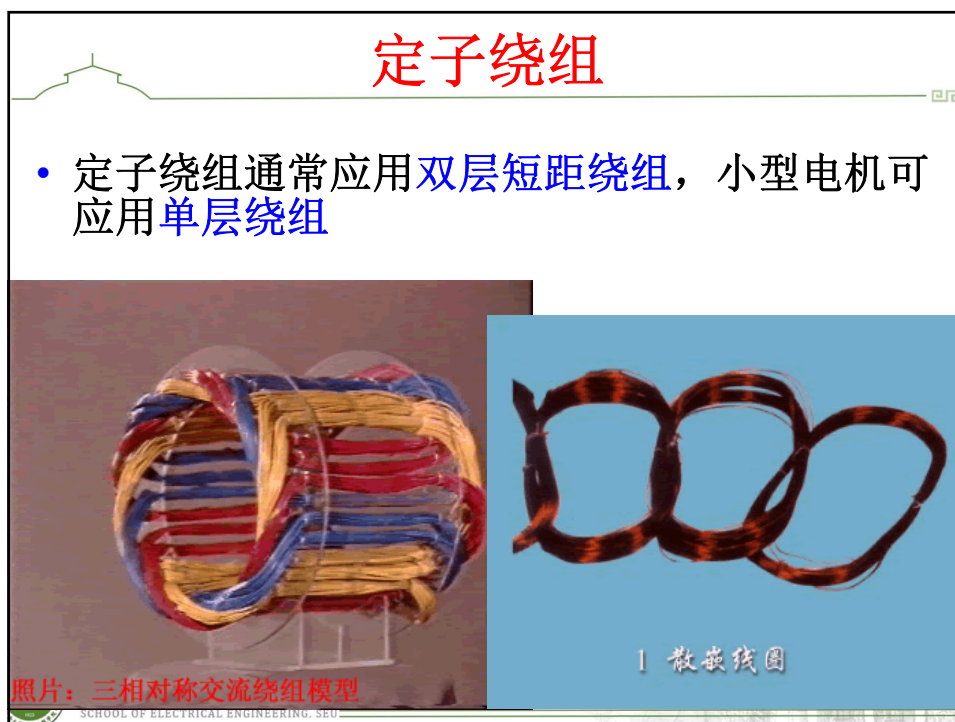
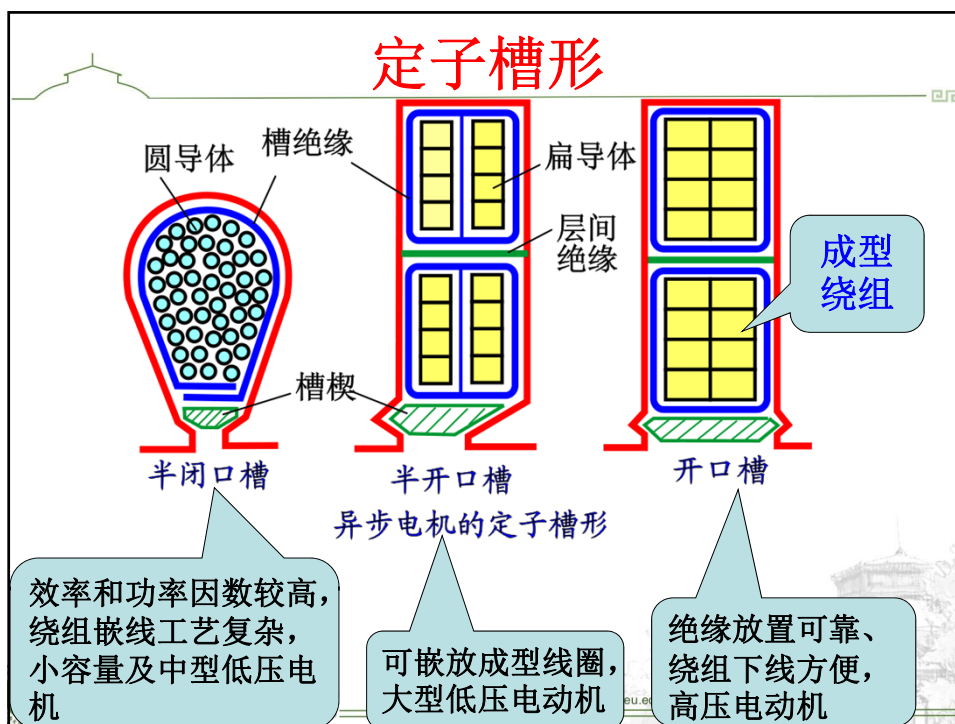
- **定子铁芯**：**磁路**部分，放置定子绕组
- 一般采用导磁性能良好和比损耗小的**电工硅钢片**叠成
- 为了嵌放定子绕组，在定子铁心**内圆**冲出许多形状相同的槽，组成**定子槽**
- **定子绕组**：**电路**部分，产生**感应电势**
- **机座**：固定和支撑定子铁芯



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>





## II. 转子

- 转子铁芯：磁路部分，一般由硅钢片叠成
  - 在转子铁心上开有槽，以供放置或浇注转子绕组
- 转子绕组：电路部分，产生感应电势、感应电流和电磁转矩
- 转轴

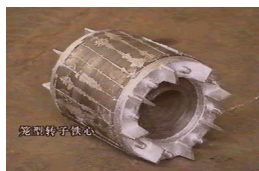


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

### II-1. 笼型转子

- 转子
  - 转子铁芯特点：“外圈开槽”，槽中下多相对称绕组
- 1. 笼型：槽中用铜条，两头用端环焊接；  
squirrel-cage rotor 现多用“铝浇铸”方法；特斯拉采用“铜转子”  
注意：转子绕组是短路的



- 气隙
  - 和其它电机相比较小，一般在零点几毫米



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

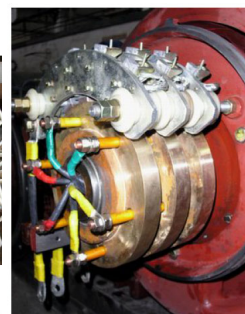
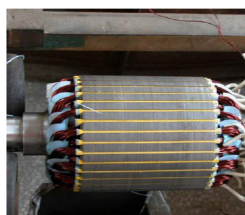
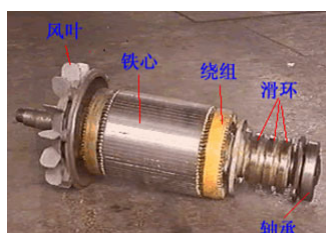
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



## II-2. 绕线型转子

### 2、绕线型异步电机转子结构

- 和笼型感应电机定子一样，只是转子不同，其他基本相同
- 星形三相绕组，外接滑环，电阻器，铜排
- 正常工作时短路，起动、调速时用电阻器



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 绕线式转子

### ➤ 绕线式转子wound rotor:

- 铁芯上绕有一对称绕组，和定子绕组有相同的极数，且常常制成相同的相数
- 通常采用对称的三相绕组，连接成星形
- 转子的一端装有三个集电环，各与转子绕组的三个起始端相连接。每个集电环上各有一电刷，通过电刷把转子绕组与外接变阻器相接
- 外接变阻器的目的是改善起动特性（增加起动转矩，减小起动电流）或用以调节电动机的转速

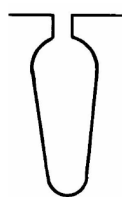


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

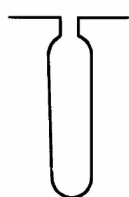
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 转子槽形

- 槽形的选择主要决定于对运行性能和起动性能的要求



平行齿



平行槽



凸形槽



闭口槽



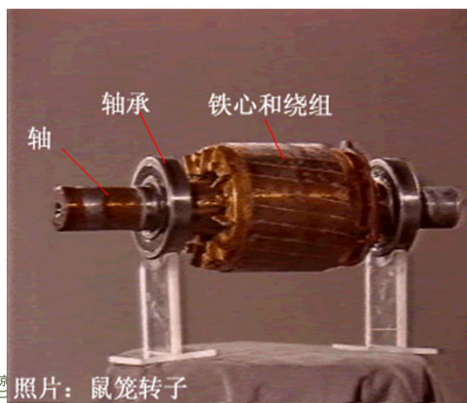
东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 转轴



照片：轴



照片：鼠笼转子



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京

### III. 气隙

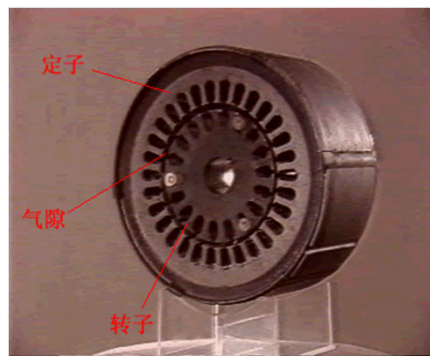
#### 3. 气隙

定、转子之间的间隙，也是电机主磁路的组成部分。

气隙大小对异步电机的性能影响很大。

为了减小电机主磁路的磁阻，降低电机的励磁电流，提高电机的功率因数，气隙应尽可能小。异步电机气隙长度应为定、转子在运行中不发生机械摩擦所允许的最小值。

中、小型异步电机中，气隙长度一般为0.2~1.5mm。



东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

### IV. 铭牌的额定值

<div> <div>强力</div> </div>	三相异步电动机		
型号 Y180L — 6		编号	
功率 15 KW	电压 380 V	电流 31 A	转速 970 r/min
接法 $\Delta$ 图	工作制 S1	50Hz	LW. 78 dB(A)
	防护等级IP44	B 级绝缘	重量 180 kg
标准编号JB/T10391-2002			200 年 月
杭州强力电机有限公司			

电动机的绝缘等级是指其所用绝缘材料的耐热等级

B级绝缘说明的是该发电机采用的绝缘耐热温度为130℃

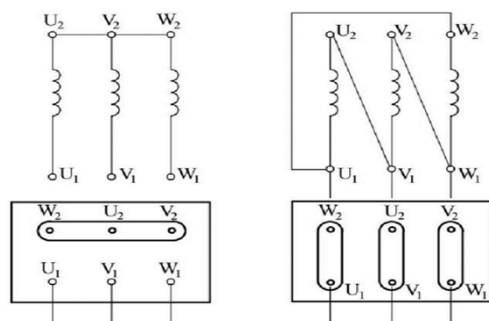


东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## IV. 铭牌的额定值



**IP44**标志电动机能防护大于**1MM**的固体异物入内，同时能防溅水

**S1**是电机连续工作制的代码

短时工作制**S2**：持续时间为**30min**和**60min**

断续周期工作制**S3**、**S4**、**S5**每一工作周期的时间为**10min**



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## IV. 铭牌的额定值

- 额定功率  $P_N$ ，指电动机在额定方式下运行时，转轴上输出的**机械功率**(**W**或**kW**)
- 额定电压  $U_N$ ，指电动机在额定方式运行时定子绕组应加的**线电压**(**V**或**kV**)
- 额定电流  $I_N$ ，指电动机在额定电压和额定功率状态下运行时，流入定子绕组的**线电流**(**A**)
- 额定频率  $f$ ，我国工业频率为 **50Hz**
- 额定转速  $n_N$ ，指在额定状态下运行时的**转子转速**(**r/min**)



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

## IV. 铭牌的额定值

➤ 对三相异步电动机，额定功率  $P_N$ ：

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta_N \cos \phi_N$$

➤ 三相异步电动机的主要技术指标

- 效率、功率因数
- 起动性能（堵转转矩、堵转电流和起动过程中的最小转矩）
- 最大转矩和噪声、振动



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 2. 异步电机的运行状态和磁场

➤ 电磁过程

- 异步电动机定子上有**三相对称的交流绕组**
- 三相对称交流绕组通入**三相对称交流电流**时，将在电机气隙空间产生**旋转磁场**
- 转子绕组的导体处于旋转磁场中，**切割磁力线**，并产生**感应电势**（判断感应电势方向）
- 转子导体通过端环自成闭合回路，流过**感应电流**
- **感应电流**与**旋转磁场**相互作用产生**电磁力**（判断电磁力的方向）
- **电磁力**作用在转子上将产生**电磁转矩**，并驱动转子旋转
- 根据以上**电磁感应原理**，异步电动机也叫**感应电动机**



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



## 2. 异步电机的运行状态和磁场

### 异步电机的转差率

**同步转速 $n_1$** ----定子绕组中流过频率为 $f_1$ 的三相对称电流，在气隙中产生的基波旋转磁场相对于定子绕组的转速为 $n_1$ 。该转速大小取决于电流的频率 $f_1$ 和绕组的极对数 $p$ ，转向为从超前电流相绕组转向滞后电流相绕组。

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

**转子转速 $n$** ----转子的机械转速。

**转差率 $s$** ----同步转速 $n_1$ 与转子转速 $n$ 之差对同步转速 $n_1$ 之比值

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## 2. 异步电机的运行状态和磁场

### ➤ 异步电机的运行状态

- 三种运行方式 **转差率 $s$** ， $s=(n_1-n)/n_1$ 
  - ❖ 电动机运行
  - ❖ 发电机运行
  - ❖ 电磁制动
- 分析时，从作用于转子上的**电磁力或电磁转矩**（*torque*）的方向，以及**定子电势 $e$ 和定子电流 $i$ 有功分量**所产生的**电功率**的正负来判断电机的运行状态



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



## I. 电动机运行

- 电能转化成机械能
- 当一对称的三相电流通入异步电机的定子绕组，在空气隙中便产生一旋转磁场以同步转速  $n_1$  旋转
- 条件：转子导体切割磁力线，并产生感应电势
- 转子导体中的感应电流与旋转磁场相互作用，使转子导体上受到一电磁力  $F_e$ ，其方向与旋转磁场的旋转方向相同
- 在电磁力的作用下形成电磁转矩，拖动转子顺着旋转磁场方向旋转

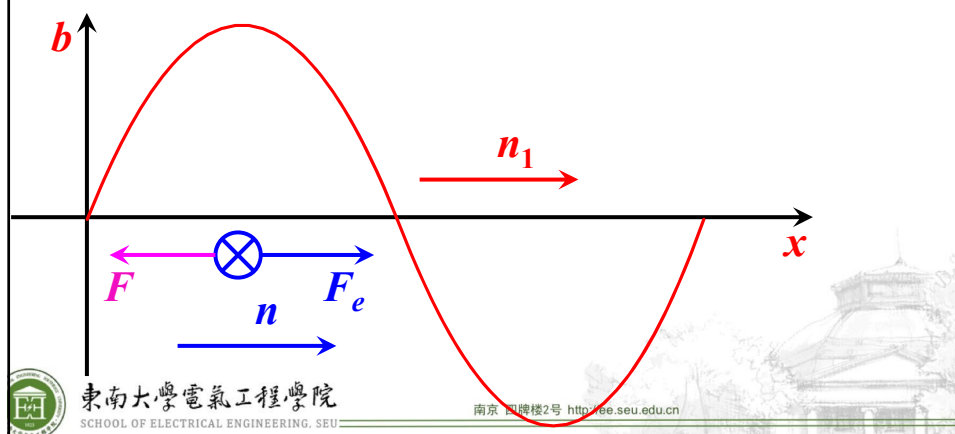


东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 电动机运行

- 电磁力  $F_e$  为原动力，相应的电磁转矩为驱动转矩，负载力  $F$  为阻力，相应的转矩为阻力矩
- 转子必须与旋转磁场保持一定的速度差



东南大学电气工程学院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 电动机运行

感应电机的负载变化时，转子的转速和转差率将随之而变化，使转子导体中的感应电动势、电流和作用在转子上的电磁转矩发生相应的变化，以适应负载的需要。按照转差率的正、负和大小，感应电机有电动机、发电机和电磁制动三种运行状态，如图 5-6 所示。

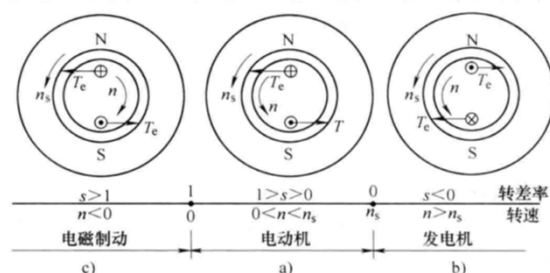


图 5-6 感应电机的三种运行状态（图中 N, S 代表气隙旋转磁场的极性，• 和 × 表示转子感应电动势和转子电流有功分量的方向）

a) 电动机状态 b) 发电机状态 c) 电磁制动状态



东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

## I. 电动机运行

- 在电动机状态， $n$  总小于同步转速  $n_1$ ，旋转磁场切割转子的相对转速为  $n_1 - n$ ，称为转差速度  $slip$
- 转差率  $s$ ：转差速度与同步转速的比值

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

- 转子绕组中的感应电势的大小与转差速度成正比，即与转差率成正比
- 空载转差率：< 0.5%
- 满载转差率：< 5%

# I. 电动机运行

结论：

$0 < n < n_1$  ,  $0 < S < 1$  : 电动机状态

转子侧：  $T_{em}$  与  $n$  同转向，  $T_{em}$  为驱动转矩，  $T_{em}\Omega > 0$  ,  
发出机械功率

定子侧： 定子绕组从电网吸收电功率

此时，吸收电功率→发出机械功率：电动机



東南大學電氣工程學院  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>